熱水力安全研究グループの研究概要と最近の成果

日本原子力研究開発機構　原子力安全・防災研究所　安全研究センター　熱水力安全研究グループ

研究目的

原子炉事故に関する熱流動や伝熱現象に関連した安全研究の分野を熱水力安全研究と呼ぶ。当研究グループでは主に以下を実施。

- 安全評価パラメータに影響し、不確かさの大きい重要現象の解明
- 炉心損傷前後の熱水力挙動・ソースターム挙動の予測手法の確立
- 評価モデルと手法の高度化・データベースの構築、不確かさ解析
- 評価手法の高度化・計測技術の開発による研究・技術基盤の向上

安全規制で必要となる技術的知見の整備、将来の規制活動に役立つ知見の創出、将来の産業界からの提案の検討に活用。

主な研究

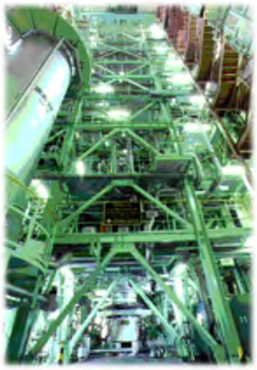
加圧熱衝撃* （PTS）

現行評価手法の技術根拠の拡充、将来の手法高度化への備えを目的

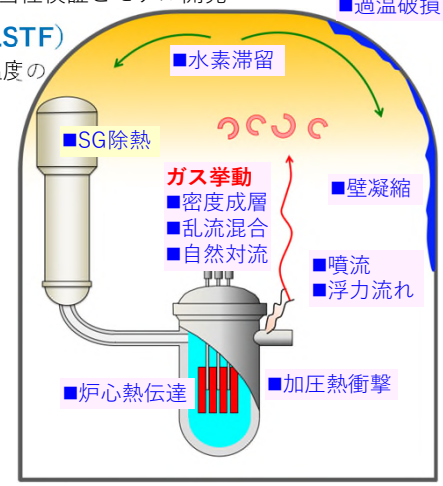
- 3ループPWRを対象としたTRACEコードによる熱流動解析
- 熱伝達評価相関式の妥当性検証とモデル開発

システム効果実験* （LSTF）

AM策に対する炉心出口温度の炉心温度反映性の評価



LSTF外観

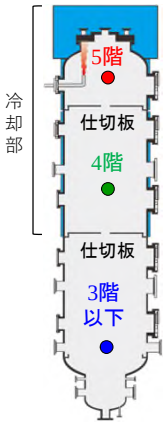


軽水炉事故時の代表的な熱水力挙動

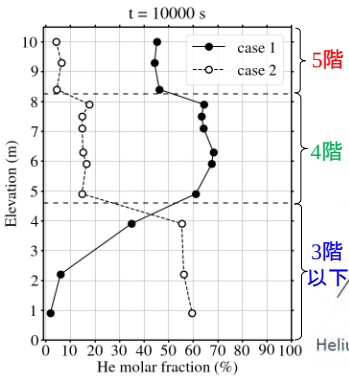
大型格納容器（CIGMA）実験・CFD解析*

*原子力規制委員会原子力規制庁の受託研究として実施された。

1F事故原子炉建屋内の水素移行挙動に関する研究



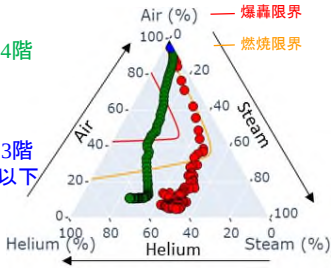
実験体系



実験結果

実験条件

	case 1	case 2
初期圧力 (MPa)	0.1	
注入温度 (°C)	120	
蒸気/ヘリウム質量流量 (g/s)	35 / 0.3	
冷却水温度 (°C)	50	90



空気-蒸気-Heの3元図

研究・技術基盤

評価手法の検証・高度化

- 最適評価コード：TRACE等
- CFDコード：OpenFOAM等

計測技術

- 速度計測：PIV、LDV、CTA等
- 気相率分布計測：EIT、UT、WMS等

最近の成果－超音波トモグラフィ** －

背景・目的・ねらい

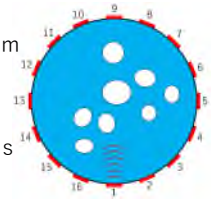
- 二相流モデルの更なる深化のため、二相流構造を加味したモデル構築の需要
- モデルの検証には断面気泡分布等の詳細な二相流計測データが必要
- 安全かつ安価に利用可能な超音波を用いたトモグラフィ計測の高度化を目的
- 従来手法で計測困難であった多数気泡計測条件に機械学習を適用して打開

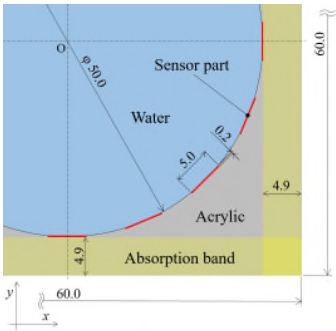
2次元シミュレーション

直径50 mmの水で満たされた円筒容器内に配置された気泡分布に対する超音波信号の伝播挙動をシミュレーション

シミュレーション条件

✓計算領域：60 mm × 60 mm
✓メッシュサイズ：75 μm
✓総メッシュ数：640,000
✓解析時間：5, 10 × 10^{-5} s
✓時間ステップ：2.2 × 10^{-8} s

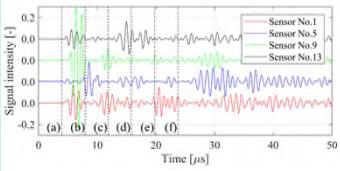




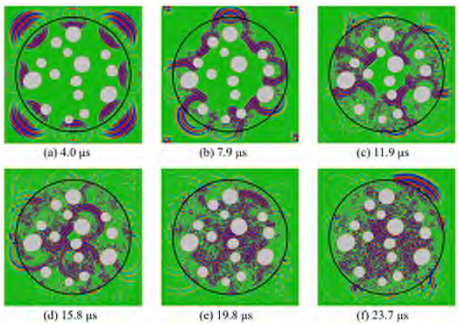
超音波トモグラフィ概要図
（左：全体概略図、右：シミュレーション概略図）

シミュレーション結果

- 気泡数が多いと受信波形や音圧分布は複雑化
- どの波形がどの気泡表面で反射したのか識別が困難
- 受信波形は気泡分布の情報を確実に内包
- 適切に処理できれば気泡分布を予測可能



センサー部で得られた受信波形



シミュレーションの各時刻における音圧分布

ニューラルネットワークを用いた気泡分布・断面平均気相率の予測

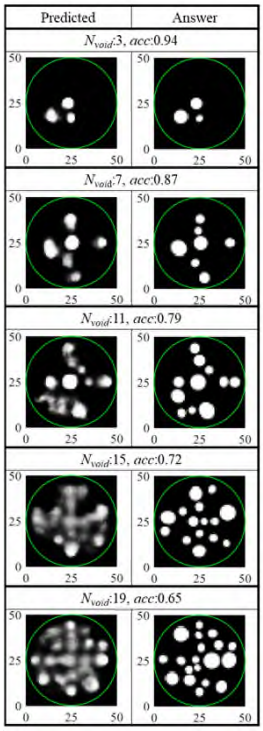
- シミュレーションの受信波形を入力、気泡分布を答えとして、ニューラルネットワーク（NN）を学習
- ➢ 学習用データ：50,000ケース
- ➢ 評価用データ：10,000ケース
- ➢ NNの構成：全結合
  中間層：1層
- 学習済みNNに評価用データを入力したときの出力と答えの気泡分布を比較して予測性能を評価

気泡分布予測

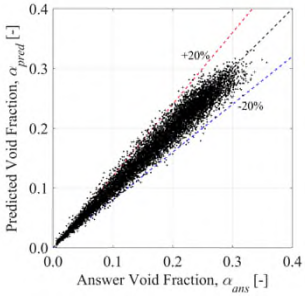
- 気泡数が10個未満のとき、高い精度で気泡分布を予測可能
- 気泡数が多いほど予測性能が低下

断面平均気相率予測

- 気泡分布の予測結果から算出
- 気相率によらず高い予測性能



気泡分布予測結果



断面平均気相率予測結果

結論

2次元シミュレーションに基づき、機械学習を用いた超音波トモグラフィの実現可能性を検証

- 複雑な受信信号をNNに学習させることで、多数気泡条件でも断面気相率分布をある程度予測可能
- 気相率分布だけでなく、断面平均気相率も高い精度で予測可能

成果とその活用

- 2次元シミュレーションに基づき、多数気泡が分布する断面に対する機械学習に基づく超音波トモグラフィの実現可能性を示した。
- 二相流予測モデルの高度化のための実験データ取得に向けた断面内気泡分布計測技術の高度化に活用が期待される。

**: Y. Wada, Y. Hirose, Y. Sibamoto, Ultrasonics, 141, 107346 (2024).https://doi.org/10.1016/j.ultras.2024.107346